
Geinitz, Veronika; Liebermann, Kersten :

***Bewertung und Beeinflussung der Festigkeitskennwerte
von Federstahldrähten***

*Publikation entstand im Rahmen der Veranstaltung
(wurden aber versehentlich nicht im gleichnamigen Tagungsband
abgedruckt):*

Federn - unverzichtbare Bauteile der Technik : Tagung Fulda, 7. und
8. November 2006 / VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion,
Vertrieb.

Bewertung und Beeinflussung der Festigkeitskennwerte von Federstahldrähten

Dr.-Ing. V. **Geinitz**, TU Ilmenau, Ilmenau;

Dr.-Ing. K. **Liebermann**, TU Ilmenau, Ilmenau;

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt die Notwendigkeit der Ermittlung von funktionsrelevanten Federdrahtkennwerten, stellt das Zug- und Torsionsverhalten von ausgesuchten Beispieldrähten vor, zeigt die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Materialkenngrößen aus den Verformungskennlinien auf und beschreibt das Funktionsverhalten von Schraubenfedern, die aus diesen Drähten hergestellt wurden. Beispielhaft wird für zwei verschiedene Drahtsorten die Beeinflussung der Festigkeitskennwerte im Drahtherstellprozess vorgestellt.

1. Problemstellung

Die steigenden Anforderungen an Federn bezüglich Einhaltung ihrer Funktion und Gestalt, besserem Langzeitverhalten, erhöhter Belastbarkeit und Lebensdauer sowie geringerem Werkstoffeinsatz und Bauvolumen können die Federhersteller nur erfüllen, wenn die Drahtindustrie Federstahldraht bereitstellt, der diesen wachsenden Anforderungen gerecht wird.

Für die Federherstellung wird Draht mit einer guten Umformbarkeit bei möglichst geringen Spannungen gefordert, während für Funktion und Einsatz eine möglichst hohe Festigkeit und damit verbunden ein hohes Energiespeichervermögen anzustreben ist.

Bei der Herstellung der Schraubenfeder wird das Drahtmaterial hauptsächlich auf Biegung beansprucht, bei der Funktion überwiegend auf Torsion (Tabelle 1). Die grundlegende Materialkenngröße zur Dimensionierung von Schraubenfedern ist derzeit jedoch die im genormten Zugversuch [1] ermittelte Zugfestigkeit R_m (Tabelle 2). Entsprechend der Hauptbeanspruchung der Schraubenfeder auf Torsion sollte ihre Dimensionierung anhand der Torsionsfließgrenze t_{tF} erfolgen, die aber aufgrund des für Federstahldrähte fehlenden genormten Torsionsversuches nicht bekannt ist [3]. Da die verwendeten Federstahldrähte über ihren Querschnitt aufgrund der Kaltverfestigung beim Drahtziehen keine homogenen Eigenschaften besitzen und auch nicht isotrop sind, ist die praxisübliche Übertragung der bei Zugbeanspruchung ermittelten Eigenschaften auf das Verhalten bei Torsions- und Biegebeanspruchung problematisch.

Außerdem setzt die Dimensionierung von Schraubenfedern nach DIN [2] Modellvereinbarungen voraus, die in der Praxis nicht eingehalten werden. So ist z.B. die Verformung des Bauteiles Feder nicht klein gegenüber den Federabmessungen selbst und auch die Werkstoffbeanspruchung erfolgt nicht nur innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Hooke'schen Gesetzes, beispielsweise im Zusammenhang mit dem Arbeitsgang Vorsetzen. Das Ziel der Federdimensionierung besteht in der Auswahl des Federdrahtmaterials und der Festlegung der Abmessungen der Feder. Die Federparameter müssen dabei so gewählt werden, dass damit die geforderte Funktion erfüllt wird und sich die Feder auch fertigen lässt.

Tabelle 1: Beanspruchung des Federstahldrahtes

Beanspruchungsart	Wo hauptsächlich relevant?
Torsionsbeanspruchung	Funktion von auf Torsion belasteten Federn (z.B. Schraubendruck- und –zugfedern)
Biegebeanspruchung	Herstellung von Federn Funktion von auf Biegung belasteten Federn (z.B. Schenkelfedern)
Zugbeanspruchung	Bestimmung von Drahtkennwerten, derzeit übliche Federdimensionierung

Tabelle 2: Dimensionierung von torsionsbelasteten Federn [2]

Hauptbeanspruchung	Federbeispiel	Verformungsbeziehung	Festigkeitsbeziehung
Torsion	Schraubenfeder	$s = \frac{8D^3Fn}{Gd^4} = \frac{F}{R}$	$t_{t\text{ vorh}} = \frac{8FD}{pd^3} = \frac{Gds}{pD^2n} \leq t_{t\text{ zul}} = 0,56 R_m$

Derzeit übliche Weiterentwicklungen von Federstahldrähten haben oftmals die Steigerung der Zugfestigkeit R_m bei gleich bleibender Verarbeitbarkeit des Federstahldrahtes zum Ziel. Die konsequente Weiterführung der hier dargestellten Philosophie führt zu einer Veränderung dieser Zielstellung dahingehend, dass eine Erhöhung der Torsionsfließgrenze angestrebt wird [8].

2. Bestimmung von Federdrahtkennwerten

2.1. Zug- und Torsionsversuche an dünnen Federstahldrähten

Um die Torsionsfließgrenze bzw. das Torsionsverhalten von Federstahldrähten ermitteln zu können, wurde äquivalent zum Zugversuch ein auf dünne Stahldrähte angepasster Ver-

suchsstand entwickelt und aufgebaut. Damit ist es möglich, das Materialverhalten des Drahtes nicht nur durch die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie des Zugversuchs, sondern auch mit der Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie sowie den jeweils aus den Kennlinien errechenbaren Materialparametern zu beschreiben (Tabellen 3 und 4).

Tabelle 3: Übersicht über Zug- und Torsionsversuch

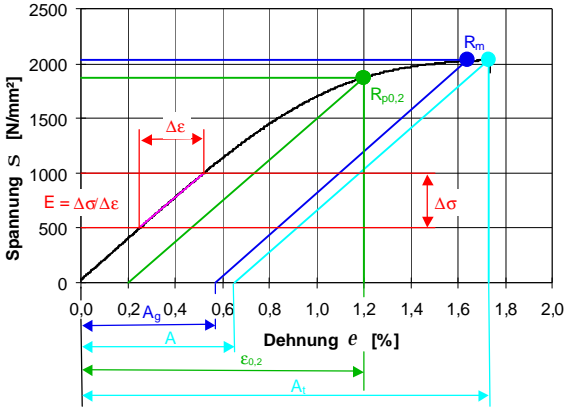
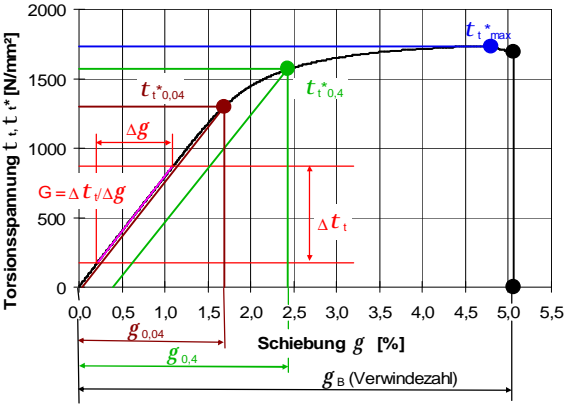
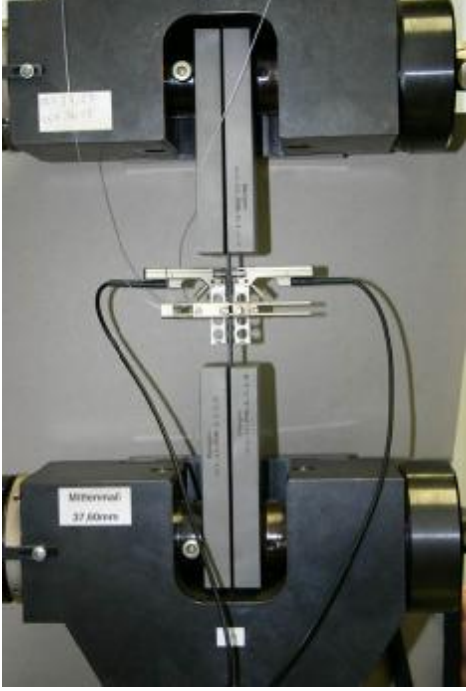
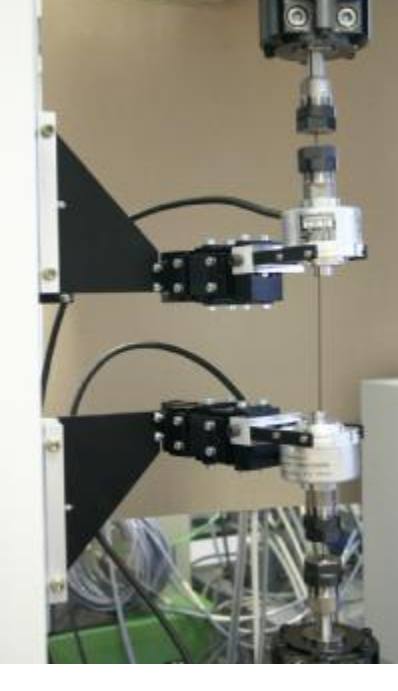
Zugversuch	Torsionsversuch
	
Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eines Federstahldrahtes im Zugversuch	Spannungs-Schiebungs-Kennlinie eines Federstahldrahtes im Torsionsversuch
	
Bild 1: Zugversuchsstand mit Feindehnungsaufnehmer [6]	Bild 2: Torsionsversuchsstand mit Feinschiebungsaufnehmer [6]

Tabelle 4: Zug- und Torsionsversuchskennwerte

Zugversuchskennwerte		Torsionsversuchskennwerte	
A [%]	Bruchdehnung		
A _g [%]	Gleichmaßdehnung		
A _t [%]	Gesamtdehnung bei Bruch	N _t	Verwindenzahl
E [N/mm ²]	Elastizitätsmodul, E-Modul	G [N/mm ²]	Gleitmodul, G-Modul
R _{p0,01} [N/mm ²]	Technische Fließgrenze bei Zugbeanspruchung	t _t [*] _{0,04} [N/mm ²]	Technische Fließgrenze bei Torsionsbeanspruchung
R _{p0,2} [N/mm ²]	Zugspannung bei einer bleibenden Dehnung von 0,2 % (Zugdehngrenze)	t _t [*] _{0,4} [N/mm ²]	Torsionsspannungswert bei 0,4 % plastischer Schiebung, (Torsionsdehngrenze)
R _m [N/mm ²]	Zugfestigkeit	t _t [*] _{max} [N/mm ²]	Maximale Torsionsspannung
Z [%]	Brucheinschnürung		
ε [%]	Gesamtdehnung	γ [%]	Gesamtschiebung
e _{0,2} [%]	Gesamtdehnung bei 0,2 % plastischer Dehnung	γ _{0,04} [%]	Gesamtschiebung bei 0,04 % plastischer Schiebung
σ [N/mm ²]	Normalspannung (allgemein)	τ _t [N/mm ²] τ _t [*] [N/mm ²]	Torsionsspannung im elastischen Bereich Torsionsspannung im plastischen Bereich

2.2. Beeinflussung der Festigkeitskennwerte durch Anlassen

Nach dem Federwinden werden die Rohfedern zum Abbau der Biegeeigenstressungen angelassen. Ein weiterer wichtiger Effekt des Anlassens ist aber auch die künstliche Alterung des Drahtes und die damit einhergehende Erhöhung der Zugfestigkeit und Proportionalitätsgrenze. Die derzeit zur Ermittlung von R_m durchgeführten Zugversuche erfolgen aber i.d.R. am nicht angelassenen Draht.

Die Bilder 3 und 4 [6] zeigen exemplarisch den Verlauf von Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinien an Federdrähten aus ölschlussvergütetem bzw. nicht rostendem Federstahldraht und deren Beeinflussung durch verschiedene Anlasstemperaturen. Für die Funktion der Schraubenfeder relevant ist aber das Torsionsverhalten der Federdrähte. Die Bilder 5 und 6 zeigen die Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinien der beiden o.g. Federdrahtsorten.

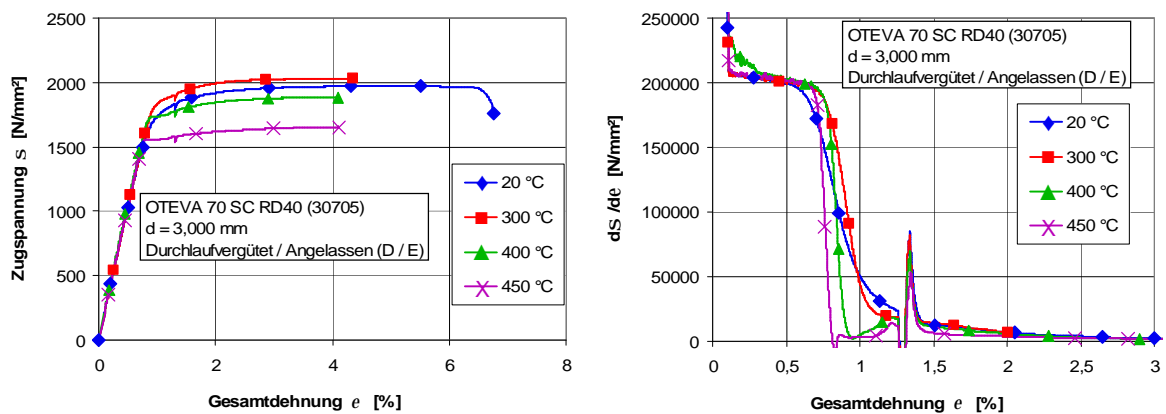


Bild 3: Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinie und deren erste Ableitung (Anstieg) von einem ölschlussvergüteten Federstahldraht, $d = 3$ mm, verschiedene Anlasstemperaturen

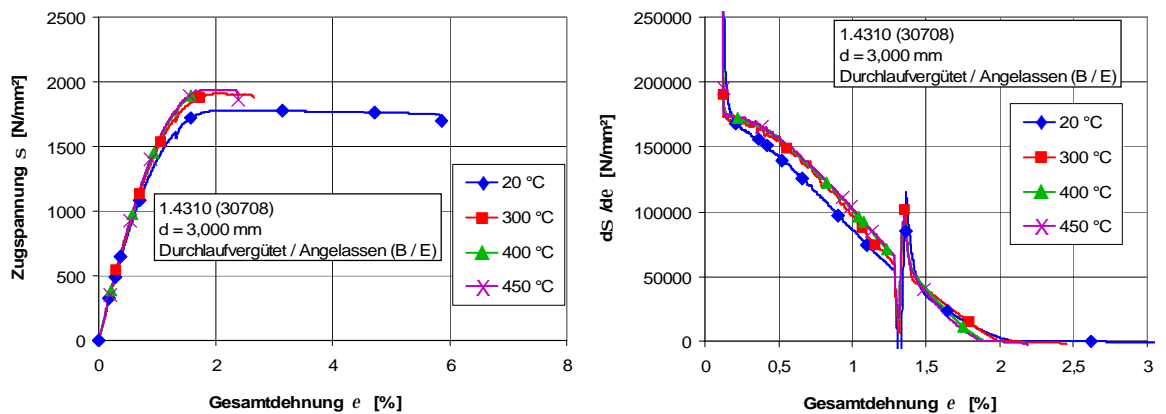


Bild 4: Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinie und deren erste Ableitung (Anstieg) von einem nicht rostenden Federstahldraht, $d = 3$ mm, verschiedene Anlasstemperaturen

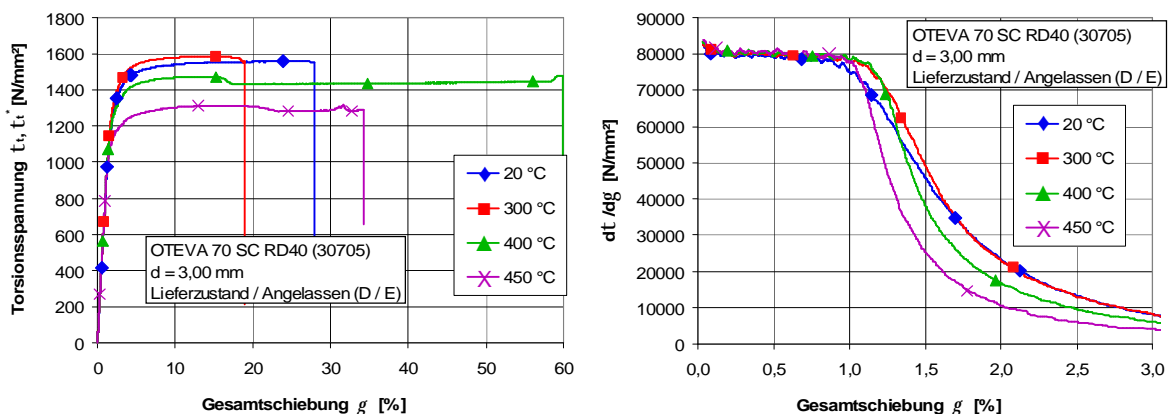


Bild 5: Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie (links) und deren erste Ableitung (rechts) in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur für einen ölschlussvergüteten Federstahldraht mit $d = 3$ mm

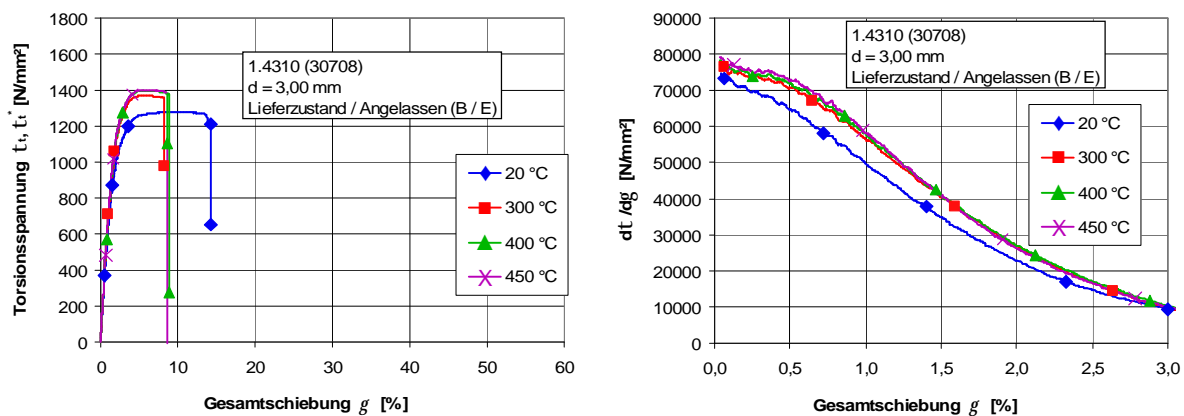


Bild 6: Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinie (links) und deren erste Ableitung (rechts) in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur für einen nicht rostenden Federstahldraht mit $d = 3 \text{ mm}$

Die Auswertung der Torsionsversuche lässt Rückschlüsse auf eine optimale Anlasstemperatur hinsichtlich höchstmöglicher Auslastung zu. Die Torsionsfließgrenze erreicht für ölschlussvergütete Federstahldrähte bei 300 °C ein Maximum, für nicht rostende Federstahldrähte liegt es bei ca. 450 °C.

Die Auswertung der Anstiege der Torsionsversuchskennlinien von ölschlussvergüteten Federstahldrähten im nicht angelassenen und angelassenen Zustand ergaben, dass sie bis zu einer Gesamtschiebung von 0,8 % ein nahezu linear elastisches Werkstoffverhalten aufweisen und damit ihr Umformverhalten dem idealisierten Werkstoffmodell sehr nahe kommt (Bild 5). Für nicht angelassene und für angelassene nicht rostende Federstahldrähte fallen die Kurven der ersten Ableitung der Torsionsspannungs-Schiebungs-Kennlinien auch bei kleinen Gesamtschiebungswerten bereits deutlich ab (Bild 6). Das bringt Probleme mit sich bei der Bestimmung der Torsionsparameter der Drähte.

Aus den Zug- und Torsionsversuchskennlinien werden die das Umformverhalten des Drahtes charakterisierenden Parameter E- Modul bzw. G-Modul, Fließgrenzen sowie Dehn- und Bruchgrenzen ermittelt. In der klassischen Methode wird dafür eine Tangente an den linearen Teil der Kennlinie bei kleinen Verformungswerten angelegt. Der Anstieg dieser Tangente entspricht dem E- bzw. G-Modul. Durch Verschieben dieser Tangente können dann die technische Fließgrenze ($R_{p0,01}$, $t_t^*_{0,04}$), die Dehngrenze ($R_{p0,2}$, $t_t^*_{0,4}$) und weitere Grenzen bestimmt werden.

Wenn die Verformungskennlinie bei kleinen Verformungswerten nicht linear ist, müssen andere Auswertelgorithmen angewendet werden, um entsprechende Drahtparameter ermitteln zu können. Mögliche Vorgehensweisen sind die Auswertung der ersten Ableitung der Span-

nungs-Dehnungs/Schiebungs-Kennlinien, Be- und Entlastungsversuche, Pendelversuche zur Bestätigung der E- und G-Moduli und Auswerten von Versuchen an Schraubenfedern [6]. Durch weitere Versuche muss die Frage geklärt werden, ob der festgestellte nicht lineare Zusammenhang zwischen Torsionsspannung und Schiebung auf plastische Verformungen oder auf ein nicht linear elastisches Drahtverhalten zurückzuführen ist. Das lässt sich durch Versuche mit zyklischem Be- und Entlasten ermitteln.

2.3. Beeinflussung der Festigkeitskennwerte durch Vorsetzen nach dem Anlassen

Eine Möglichkeit zum Einbringen von günstig gerichteten Torsionseigenstressen in eine Schraubenfeder ist der in der Praxis übliche Arbeitsschritt Vorsetzen. Durch das Vorsetzen mit plastischer Verformung verbleiben in der Feder Torsionseigenstressen, die der späteren Funktionsspannung entgegengesetzt gerichtet sind. Das Vorsetzen mit großen Setzbeiträgen ermöglicht das Einbringen von großen Torsionseigenstressen in den Draht der Schraubenfeder [3].

Das Vorsetzen kann an nicht zur Feder verwundenen Drahtproben als Vortordieren simuliert werden. Auch das Vorsetzen bewirkt eine deutliche Veränderung des Materialverhaltens. Das gilt besonders für die zur Dimensionierung wichtigen Torsionsfließgrenze t_{tF} .

Bisher wird die Beeinflussung des Vorsetzens bei der Federdimensionierung material- und federparameterunabhängig durch das Ändern eines Faktors berücksichtigt [3]:

$$\text{nicht vorgesetzte Druckfedern: } t_{c\,zul} = 0,40 \cdot R_m$$

$$\text{vorgesetzte Druckfedern: } t_{c\,zul} = 0,56 \cdot R_m$$

Aus den o.g. Gründen besteht die Notwendigkeit, das Materialverhalten an angelassenen und vorgesetzten Drähten zu bestimmen.

Tabelle 5: Auswertung von Torsionsversuchen an verschiedenen vorbehandelten Drähten (FDSiCr-Draht, $d = 1,0$ mm)

Vorbehandlung	Ermitteln der Kennwerte an nicht angelassenem Draht		Ermitteln d. Kennwerte an 300°C angelassenem Draht	
	$t_{t\,0,04}^*$ [N/mm ²]	$g_{0,04}$ [%]	$t_{t\,0,04}^*$ [N/mm ²]	$g_{0,04}$ [%]
Nicht vortordierter Draht	920	1,20	1060	1,40
Vortordiert mit 1,0 % plastischer Schiebung	1250	1,70	1470	1,90

Die Auswirkung des Anlassens und Vortordierens auf die Torsionsfließgrenze wird in Tabelle 4 durch ein Zahlenbeispiel und in den Bildern 7 und 8 durch die Kennlinien verdeutlicht [3]. Wird ein bei 300°C angelassener Draht (schwarze Linie in Bild 7 und 8) anschließend so vortordiert, dass eine plastische Schiebung $g_{pl} = 1\%$ im Draht verbleibt (schwarze Strichlinie in Bild 7 und 8), ist eine Vergrößerung der Torsionsfließgrenze $t_{t^*0,04}$ um ca. 60 % bezüglich eines nicht vorbehandelten Drahtes (graue Strichlinie in Bild 7 und 8) festzustellen.

In weiteren Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die am nicht zur Feder verwundenen Draht festgestellte Erhöhung des elastischen Formänderungsvermögens durch Anlassen und anschließendes Vorsetzen auch an Schraubenfedern realisierbar ist.

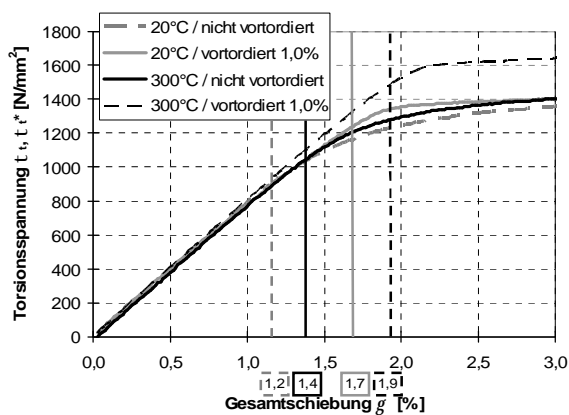


Bild 7: Torsionsspannungen t_t, t_t^* als Funktion der Gesamtschiebung g in Abhängigkeit von Anlaßtemperatur und Vortordieren für ölschlusvergüteten Draht, $d = 1,0\text{ mm}$

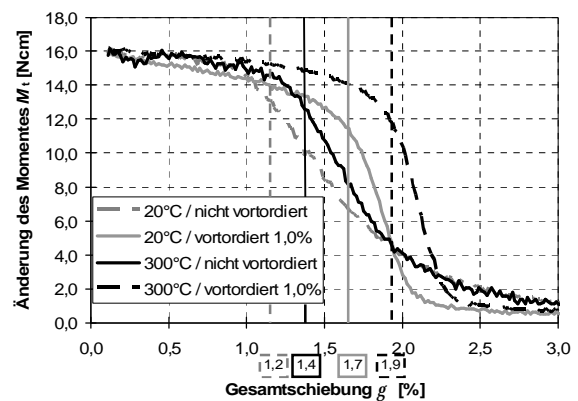


Bild 8: Anstieg der Torsionsspannungs-Gesamtschiebungs-Kennlinie von Bild 7

3. Beeinflussen der Festigkeits- und Umformeigenschaften bei ölschlusvergütetem SiCr-legierten Draht [5]

Reserven zur Verbesserung der Anwendungs- und Verarbeitungseigenschaften SiCr-legierter ölschlusvergüteter Federstahldrähte liegen zum einen im Vergütungs- und Alterungsprozess, zum anderen im Einsatz verschiedener Materialgüten. Bild 9 zeigt den technologischen Ablauf der Herstellung ölschlusvergüteter Federstahldrähte.

Den Schwerpunkt der Untersuchungen zur Beeinflussung des Festigkeits- und Umformverhaltens bildete der Vergütungsprozess, da die Austenitisierungstemperatur und -zeit, die Zusammensetzung des Abschreckmediums, die Temperatur des Bleibades beim Anlassen des gehärteten Drahtes und die gewählte Durchlaufgeschwindigkeit die Gefügeumwandlung

und damit das Festigkeits- und Umformverhalten des Federstahldrahtes entscheidend beeinflussen.

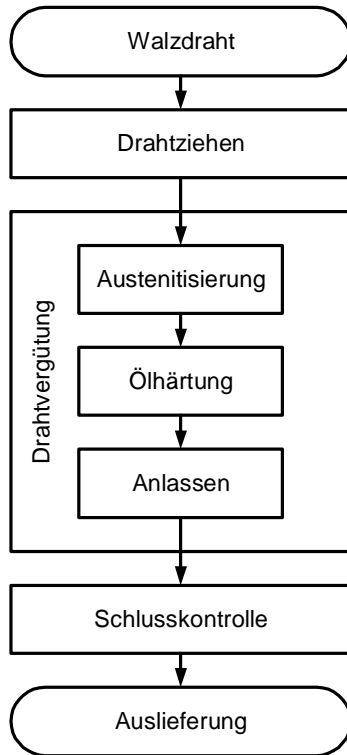
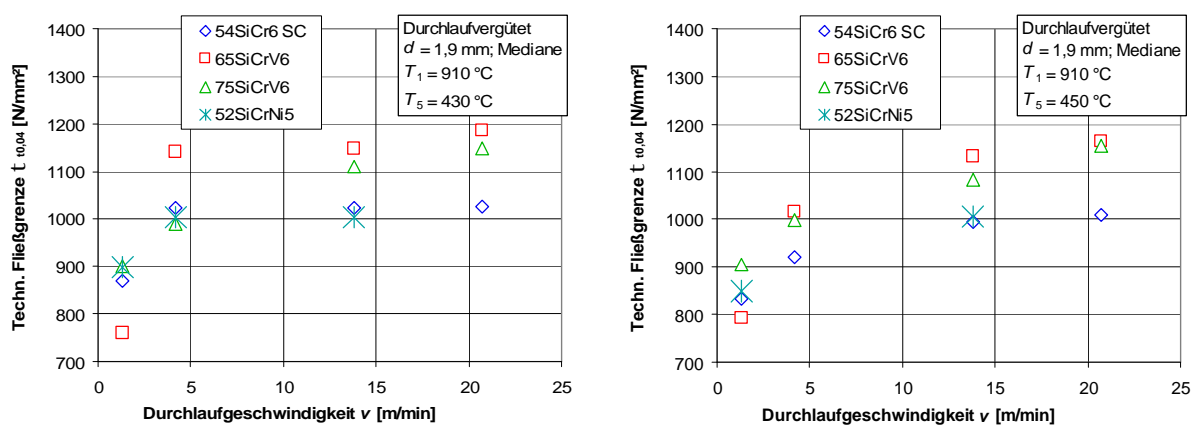


Bild 9: Vereinfachter technologischer Ablauf der Herstellung ölschlussvergüteter Federstahldrähte

3.1. Einfluss der Vergüteparameter auf das Festigkeits- und Umformverhalten



a) Vergüteanlasstemperatur $T_5 = 430$ °C

b) Vergüteanlasstemperatur $T_5 = 450$ °C

Austenitisierungstemperatur $T_1 = 910$ °C, $d = 1,9$ mm

Bild 10: Technische Torsionsfließgrenze $t_{0,04}$ in Abhängigkeit von der Durchlaufgeschwindigkeit v und der Vergüteanlasstemperatur

Eine Vergrößerung der Zugfestigkeit R_m bzw. Torsionsfestigkeit t_{\max} lässt sich, nach ihrer Wirkung geordnet, erreichen durch möglichst geringe Vergüteanlasstemperatur T_5 , möglichst geringe Vergüteanlassdauer t_5 , möglichst kleine Austenitisierungstemperatur T_1 und möglichst kleine Austenitisierungsdauer t_1 (Bild 10). Grenzen für dieses Vorgehen ergeben sich durch das Gewährleisten der notwendigen Gefügeumwandlungsvorgänge beim Austenitisieren und Vergüteanlassen.

Zunehmende Festigkeitswerte (R_m , t_{\max}) verschlechtern aber die Umformeigenschaften der Drähte (A_g , Z , N_f). Weiterhin ist festzustellen, dass zwischen den Zugversuchs-Kennwerten und den für Schraubenfedern relevanten Torsionsversuchs-Kennwerten kein fester Zusammenhang (Bild 11) besteht. Deshalb muss bei der Festlegung der Vergüteparameter geklärt werden, welche Kennwerte aufgrund der späteren Verwendung des Drahtes maßgebend und demzufolge zu optimieren sind.

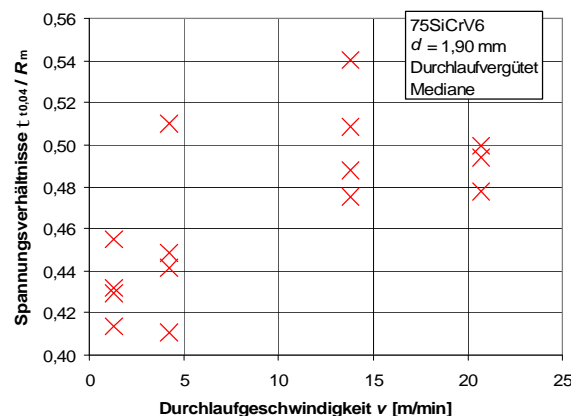


Bild 11: Veränderung des Verhältnisses $t_{0,04} / R_m$ durch die Vergüteparameter

Die für die Funktion und Auslegung von Federn wichtigen Festigkeitswerte $R_{p0,01}$ bzw. $t_{0,04}$ reagieren anders auf die Vergüteparameter als die Bruchfestigkeitskennwerte R_m und t_{\max} .

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben die Grenzwerte für die Vergüteparameter gegenüber den heute üblichen verschoben. Damit wird es künftig möglich, Vergüteparameter zu wählen, die einen Produktivitätsgewinn aufgrund höherer Durchlaufgeschwindigkeiten durch die Vergüteanlage und Energiekosteneinsparung durch niedrigere Austenitisierungstemperaturen erlauben.

3.2. Einfluss der Materialgüten auf das Festigkeits- und Umformverhalten

Neben der Variation der Prozessparameter in der Drahtvergütung wurden Drähte mit verschiedenen Materialzusammensetzungen untersucht, um den Einfluss des Kohlenstoffgehaltes und von Zulegierungen auf das Festigkeits- und Umformverhalten zu untersuchen. So

besitzen die Probedrähte unterschiedlichen C-Gehalt. Zwei Drähte enthalten zusätzlich Vanadin und ein weiterer Nickel. Die Einflüsse dieser Materialvariationen sind wie folgt zusammenzufassen (Bild 10):

- Wie erwartet, führt eine Erhöhung des C-Gehaltes und das gleichzeitige Hinzulegiere von Vanadin zur Erhöhung der Festigkeitswerte.
- Der Vanadin-legierte Draht mit 0,75 % C-Gehalt weist nur unwesentlich höhere Festigkeiten auf als der Vanadin-legierte Draht mit 0,65 % C-Gehalt.
- Der Nickelanteil zeigt keinen Einfluss auf die Festigkeit des Drahtes.
- Der Nickelanteil beeinflusst die Gleichmaßdehnung A_g positiv, zeigt aber bzgl. der Verwindeszahl N_t keinerlei Auswirkungen.
- Federn aus Draht mit Nickelanteil zeigen ein schlechteres Dauerschwingverhalten als vergleichbare Drähte ohne Nickelanteil.

3.3. Eigenschaften von Schraubenfedern

Für die aus durchlaufvergüteten Drähten mit $d = 1,9$ mm hergestellten Schraubendruckfedern sind folgende wichtige Ergebnisse zu nennen:

- Höhere Festigkeitswerte, insbesondere bewirkt durch den Festigkeitsgewinn durch das Anlassen nach dem Federwinden, führen zu einer Verkleinerung der Vorsetzverluste von Federn (Bild 12).
- Der Nickeltanteil des im Projekt untersuchten Drahtes 52SiCrNi5 hat keinen Einfluss auf das Vorsetzverhalten der Federn.
- Hinsichtlich des Relaxationsverhaltens zeigen die Drähte mit den größten Festigkeitswerten die geringsten Relaxationsverluste.
- Die erreichten Schwingspielzahlen stehen nicht in einem eindeutigen Zusammenhang mit den Festigkeitswerten der Drähte.

Für zukünftige Weiterentwicklungen ergibt sich die Notwendigkeit zu einer weiter gefassten Betrachtung des Herstellprozesses von Federstahldraht als das bisher vorausgesetzt wurde. Danach muss zur Verbesserung der Federdrahtherstellung auch der Prozess der Federherstellung und -nachbehandlung (z.B. das Anlassen und Kugelstrahlen nach dem Federwinden) in die Betrachtungen zur Optimierung des Drahtvergüteprozesses und seiner Parameter mit einbezogen werden. Der Vergüteprozess muss so gesteuert werden, dass der Draht im Auslieferungszustand gute Biegeumformeigenschaften für das Federwinden auch bei

kleinen Wickelverhältnissen aufweist und nach Durchlaufen aller weiteren Fertigungsschritte bis zum Endprodukt Feder den größtmöglichen Torsionsfestigkeitswert $t_{t0,04}$ besitzt.

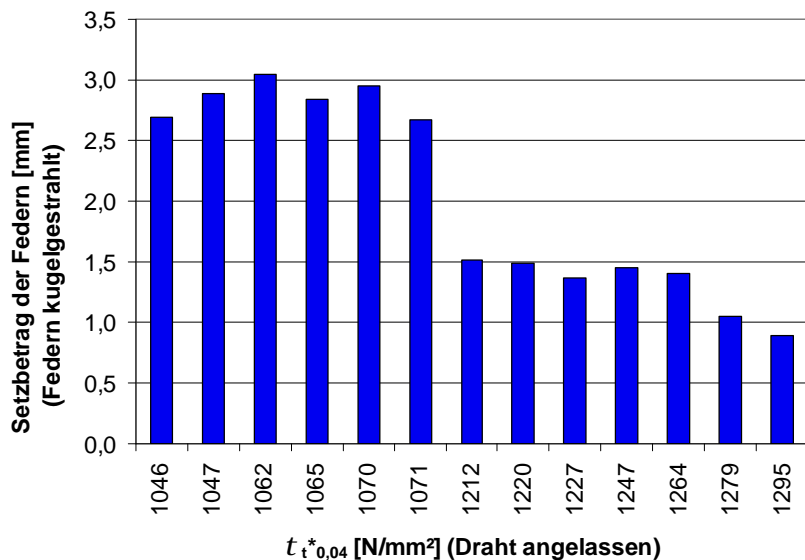


Bild 12: Setzbetrag von Federn in Abhängigkeit von der Torsionsfließgrenze ihrer Drähte

4. Beeinflussen der Festigkeits- und Umformeigenschaften bei patentiert gezogenem Draht [4]

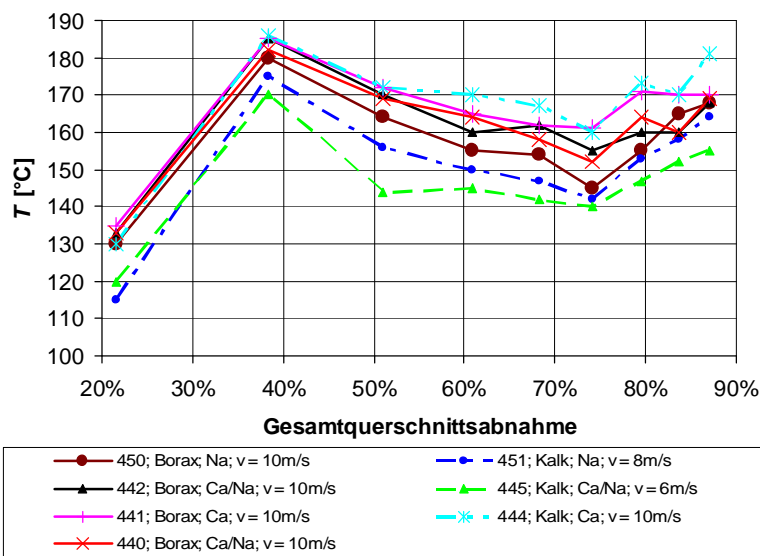


Bild 13: Temperaturmessung am Auslauf des Ziehkastens an jeder Ziehstufe

Bei der Herstellung von patentiert gezogenen Drähten kommt der gewählten Querschnittsabnahme, der Ziehgeschwindigkeit und den verwendeten Beschichtungssystemen eine gro-

ße Bedeutung bei der Beeinflussung der Drahteigenschaften zu. Bild 13 zeigt die Drahttemperatur am Auslauf jeder Ziehstufe einer neunzügigen Ziehmaschine und in Bild 14 sind die dabei entstandenen Zugfestigkeitswerte dieser Drähte dargestellt. Den Diagrammen kann man entnehmen, dass sowohl die Ziehgeschwindigkeit als auch das Ziehmittel die Dehngrenze des Drahtes beeinflussen.

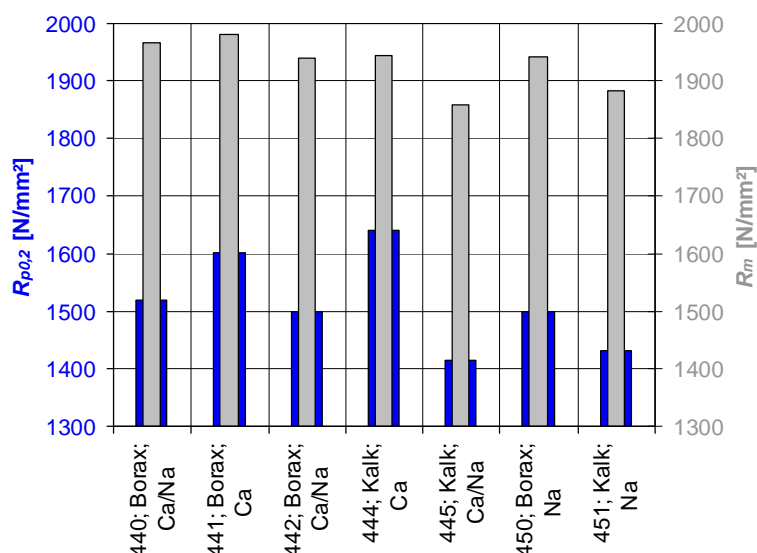


Bild 14: Ergebnisse des Zugversuchs

Aus diesen Drähten hergestellte Federn zeigen entsprechend ihrer Festigkeitswerte ein unterschiedliches Auffederungsverhalten beim Federwinden, was in einem unterschiedlichen Federdurchmesser deutlich wird.

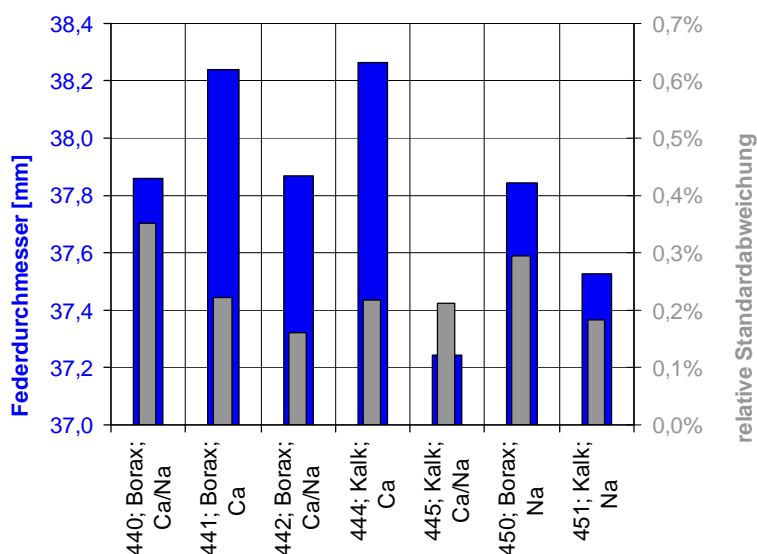


Bild 15: Vergleich des Federdurchmesser aus dem Versuch „Lange Feder“, $w = 20$

Es ist ersichtlich, dass die mit reinen Calciumstearat gefertigten Drähte einen größeren Federdurchmesser (bei $w = 20$) ergeben, als die Drähte, die mit einer Kombination von Calcium- und Natriumstearat bzw. reinen Natriumstearat gezogen wurden. Offensichtlich wirken sich auch die unterschiedlichen Ziehgeschwindigkeiten (Proben 445 und 451) auf den Federdurchmesser aus. Interessant ist der Zusammenhang zwischen der Zugdehngrenze und dem Federdurchmesser bei $w = 20$ (Bilder 14 und 15). Zwischen dem gemessenen Federdurchmesser und der Dehngrenze lässt sich eine eindeutige Korrelation erkennen.

4. Literaturangaben

- [1] EN 10002-1 Zugversuch, 1990
- [2] DIN Taschenbuch 29, Federn 1. Berechnungen, Maße, 9. Auflage, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich, 2003
- [3] Geinitz, V.: Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern. TU Ilmenau Diss. 2005, ISBN 3-938843-11-X
- [4] Schorcht, H.-J. ; Weiß, M. u.a.: Einfluss von Beschichtungen auf das Lauf- und Umformverhalten von Federstahldrähten auf Federwindeautomaten. Abschlussbericht zum A-VIF-Forschungsvorhaben A 168/S 24/10017/01
- [5] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; Kletzin, U.; u.a.: Optimierung des Festigkeits- und Umformverhaltens SiCr-legierter ölschlussvergüteter Federstahldrähte zwecks Verbesserung ihrer Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften.
Abschlussbericht AiF-Forschungsthema 13654 BR, TU Ilmenau 2006
- [6] „Ermittlung von funktions- und fertigungsrelevanten Federdrahtkennwerten (E- und G-Modul)“. Tischvorlage zur dritten Projektsitzung am 30.03 2006